

# 液体水素冷却超電導コイルの基本設計と応用に関する研究

著者	中山 知紀
号	55
学位授与機関	Tohoku University
学位授与番号	工博第4439号
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10097/62112">http://hdl.handle.net/10097/62112</a>

氏 名	なかやま ともり
授 与 学 位	中山 知 紀
学位授与年月日	博士 (工学)
学位授与の根拠法規	平成23年3月25日
研究科, 専攻の名称	学位規則第4条第1項
学 位 論 文 題 目	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 電気・通信工学専攻
	液体水素冷却超電導コイルの基本設計と応用に関する研究
指 導 教 員	東北大学教授 濱島 高太郎
論 文 審 査 委 員	主査 東北大学教授 濱島 高太郎 東北大学教授 一ノ倉 理
	東北大学教授 斎藤 浩海 東北大学客員教授 岡田健司
	東北大学准教授 津田 理

## 論文内容要旨

本研究の目的は、高効率だが冷却動力が必要であるという超電導コイルの課題と超電導磁気エネルギー貯蔵装置(SMES)などの主要構成要素である超電導コイルを構成するためには高価な超電導線材が必要であり、コスト低減が重要な課題となっていることを改善するシステムとして、液体水素(LH<sub>2</sub>)と超電導コイルを組み合わせたシステムを提案し、組み合わせの有効性を示すことである。

本論文では、LH<sub>2</sub>の高温超電導体(HTS)に対する冷媒としての特徴から LH<sub>2</sub>と超電導コイルを組み合わせた際の有効性の検討を行った。また、LH<sub>2</sub>の持つエネルギー源としての特徴と燃料電池(FC)および SMES を組み合わせた際の有効性の確認を行った。

LH<sub>2</sub>冷却による HTS コイルの運転実績やコイル作製例は無く、コイルの規模や運転可能性、特性の検討は不十分であり、これらを見積もっておくことは、LH<sub>2</sub>冷却による HTS コイルの実用化のために有用な知見を与え非常に重要である。超電導応用の中での中核要素である超電導コイルを LH<sub>2</sub>で冷却した際の運転可能性と LH<sub>2</sub>の冷媒としての特長を調査するため、超電導コイルの運転において最重要課題である運転生の観点から検討を行った。Bi-2223 HTS テープ線材で作られる超電導コイルを LH<sub>2</sub>で冷却した場合の安定性の解析を行い、HTS 超電導コイルと LH<sub>2</sub>を組み合わせたときの利点を探るために、LHe 冷却 HTS 超電導コイルとの比較を行った。MPZ 安定性の考え方をを用いて LH<sub>2</sub>冷却 HTS 超電導コイルと LHe 冷却 HTS 超電導コイルの安定性を検討した。それぞれの冷媒において 5 T, 10 T, 12 T の印加磁界下で、通電電流を横軸にとり、安定性の指標となる安定性マージンを縦軸にとったものを Fig. 1 に示す。Fig. 1 より、最も危険な擾乱であるエポキシ含浸材のクラックに対して、LH<sub>2</sub>は LHe で冷却したコイルに比べて最大磁界が 5 T のときは約 17%, 10 T のときは約 4% 運転電流を高くすることができ、超電導線材量を低減できることが分かった。解析に用いた Bi-2223 テープ線材の最も適当な安定性を与える運転条件 10 T 560 A を明らかにし、SMES コイルの運転条件指標とした。また、12 T 程度以下の印加磁界での超電導コイルの運転では、ヘリウムそのものが貴重な資源であり高価となり、LH<sub>2</sub>の温度を維持するための冷凍機動力に比べ、理論カルノーで 5 倍程度必要とする LHe の代替冷媒として LH<sub>2</sub>を十分利用可能であることを明らかにした。このことは、LH<sub>2</sub>を冷媒として用いる観点から、LH<sub>2</sub>と超電導コイルの組み合わせの際の有効性を示すものである。超電導コイルの重要な応用として SMES がある。SMES は、高効率・コンパクトに電力系統安定化や深変動補償などの電力補償を行うことができるため、実用化に向けた検討が盛んに行われている。本論文では、SMES 実用化に向けた検討に資するために、SMES をターゲットとして LH<sub>2</sub>冷却 HTS 超電導コイルの基本設計を行った。LH<sub>2</sub>冷却 HTS コイルの具体的な検討や設計は研究が進んでおらず、コンスタントテンションとな

る条件下でコイルの基本設計をおこなった検討は本研究が初となる。熱的安定性から導出された導体構成を元に、要素コイル数、導体ターン数、トロイダルコイル最外半径、要素コイルの曲率半径をパラメータに、所望の蓄積エネルギーに最適なコイルパラメータを簡便に導出できる超電導コイル設計パラメータマップを作成した(Fig. 2)。また、要素コイル数と垂直磁界と平行磁界の比の間に、要素コイル数の1/2乗に反比例する比例則を見出した。また、設計したSMES用トロイダルコイルをLHeとLH<sub>2</sub>で冷却した場合の超電導コイルの蓄積エネルギーを求め比較した結果、LH<sub>2</sub>冷却SMES用トロイダルコイルはLHe冷却SMES用トロイダルコイルに比べ約10%高い蓄積エネルギーを持つことが分かった。これは、LH<sub>2</sub>を超電導コイルの冷媒として用いることのメリットを示しており、冷媒としてのLH<sub>2</sub>と超電導コイルの組み合わせの有効性を示すものである。

LH<sub>2</sub>の持つエネルギー源としての特徴とFCおよびSMESを組み合わせた際の有効性の確認を行った。有限な資源に頼るのではなく再生可能な自然エネルギー源の利用技術、クリーンで高密度な運輸用・貯蔵エネルギー源としての水素技術を複合化して統合的に扱う自然エネルギー有効利用のためのFC+H<sub>2</sub>とSMESによる変動電力補償システムを提案した。FCだけによる風力発電の電力補償に対して、SMESを導入することで風力発電からの余剰発電力をどの程度水素エネルギーとして回収できるかを示すエネルギー回収

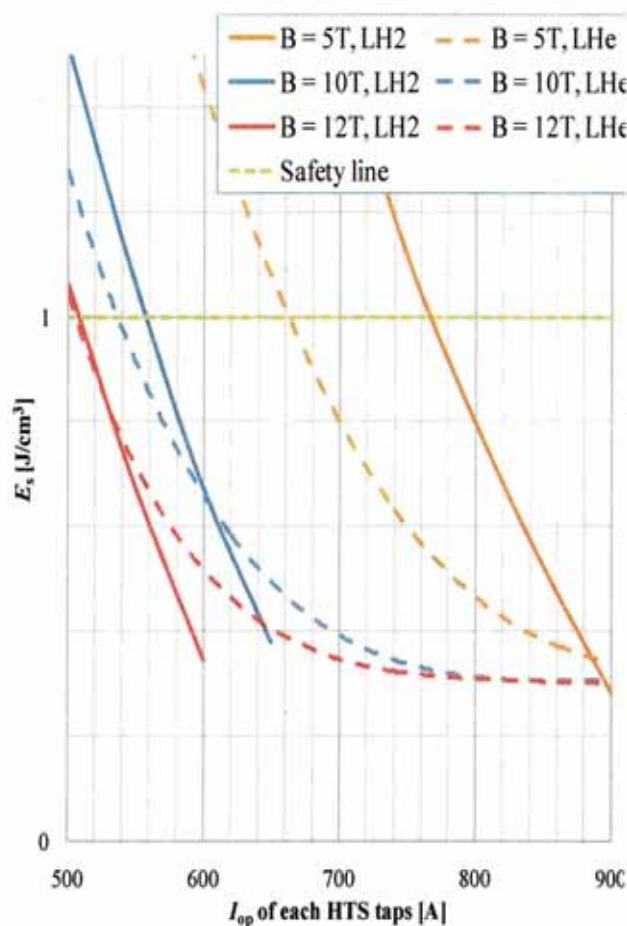


Fig.1 SMES 用コイルを LH<sub>2</sub> と LHe で冷却した場合の安定性マージンの比較

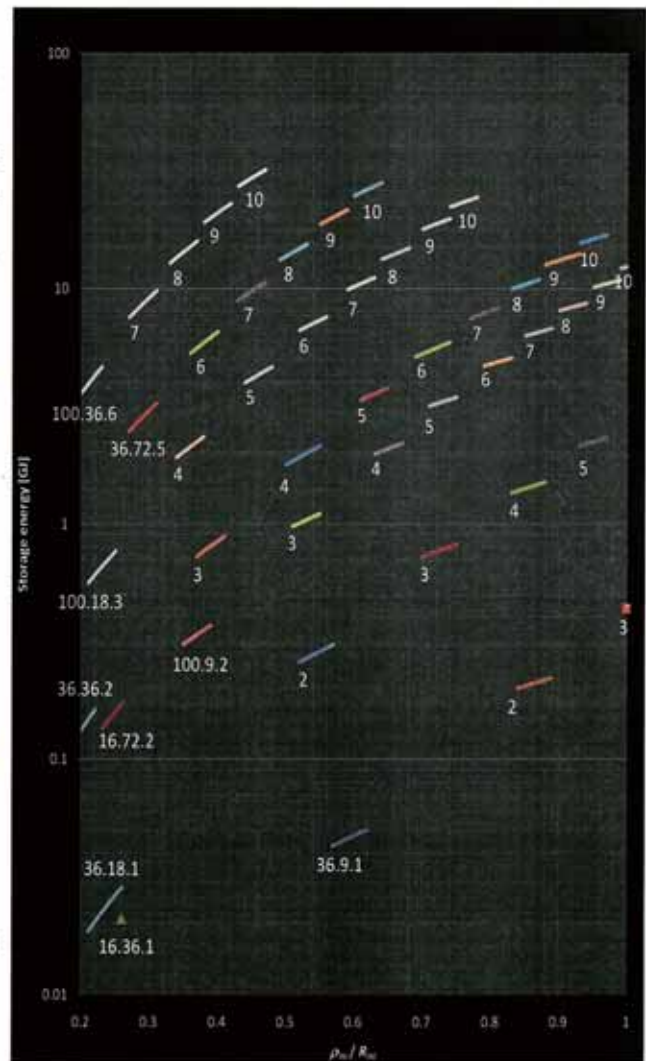


Fig.2 任意の蓄積エネルギーを満足するパラメータ  $N, N_b, R_{01}$  を導出する SMES コイル設計パラメータマップ比較



率の観点から SMES の導入効果の検討を行った。Fig. 3 に需給電力を定格 13 MW, 1 日平均発電力 5.55 MW のある 1 日の風力発電波形と昼間にピーク 5 MW となる台形形状の負荷波形を想定し, SMES の導入容量を増加させたときのエネルギー回収率と FC の余剰運転倍率を示す。ここで, FC の余剰運転倍率とは, FC で不足電力を補償するために設定するパラメータで, 不足電力よりも余剰に設定した目標値と不足電力の比である。Fig. 3 より, SMES 容量の増加とともにエネルギー回収率は増加し, SMES を導入しないケースを表す SMES 容量を 0 MJ としたときに比べ, SMES 容量を 350 MJ としたときの程度導入したときのエネルギー回収率は約 3.7 倍と大きく改善されることが分かった。エネルギー回収率は, 需給バランスによって大きく変動するが, SMES 容量を増加させ

た際のエネルギー回収率の改善は Fig. 3 と同様な傾向を示す。また, SMES 容量の増加とともに, FC の余剰運転倍率は大きく減少し, FC の無駄な運転が抑制されていることが分かる。以上の検討から, FC による風力発電の変動電力補償システムに, SMES を導入することでエネルギーを有効に貯蔵・利用できることを明らかにした。

次に, 提案した電力補償設備の中で, 最も高価になると考えられる SMES の入出力容量やエネルギー貯蔵容量を決定する手法を提案し, 提案した手法をもって SMES 容量の最適化を図った。変動の大きい WT からの電力を過不足なく目標需要へ供給するためには何らかの電力補償設備が必要であるが, WT からの発電力は予測が非常に難しく, システムに必要な設備の容量を決定することを難しくする。パッシブに変動電力を補償しようとするると過剰な設備を必要とし, 効率も悪くなる。本論文では, FC の運転特性や寿命を考慮して, 電力変動のおおまかな変動を FC が担当し, 素早い変動を SMES が担当する制御手法を提案した。変動電力をおおまかな変動電力と素早い変動電力に分解するために状態空間表現を用いた状態空間モデルを構築し, トレンドモデルを適用した。構築したモデルに対してカルマンフィルタによる変動電力のトレンドの長期将来予測を行い, FC に指令値として与えておくことで予め不足電力に近い出力を FC から出力しておくという電力補償アルゴリズムをとることで, SMES 容量の低減を図った。

WT と需用電力の差分変動電力  $P_{\Delta r}$  中に含まれるトレンドを正確に表現するために, トレンドには長期的なトレンド (long) と短期的なトレンド (short) の 2 種類が含まれていると仮定して, 2 種類のトレンドを合成するトレンド合成モデル (intermediate) を提案した。それぞれのトレンドモデルによる FC が出力を開始してから定格出力の 95% 以上に達する時間である 30 秒先を予測した結果  $P_{PE}^{\dagger}$  を Fig. 4 に示す。Fig. 4 から, 提案したトレンド合成モデル  $P_{PE}^{\dagger}$  (intermediate) は, 緩やか過ぎる予測をもたらす長期トレンド  $P_{PE}^{\dagger}$  (long) を用いた予測や過剰な追従を要求する短期トレンド  $P_{PE}^{\dagger}$  (short) を用いた予測に比べて FC の運転に適当な予測をもたらすことが分かった。変動補償成分である  $P_{\Delta r}$  とトレンド予測値の差分が SMES の補償する電力成分であり, これを積分した符号付き面積の符号が入れ替わる 1 つ 1 つが SMES に要求される蓄積エネルギー容量となる。トレンド合成の重み  $\alpha$  を 0 から 1 まで変化させたときの SMES に必要となる蓄積エネルギー容量を計算したものを Fig. 5 に示す。ここで, トレンド合成の重み  $\alpha$  が 0 のときは短期

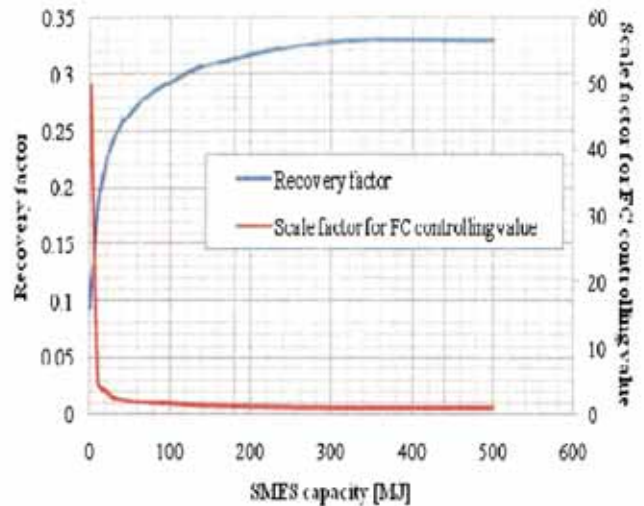


Fig. 3 ある 1 日における SMES 導入によるエネルギー回収率の改善効果と FC を余剰に運転する際の倍率

トレンドモデル, 1 のときは長期トレンドモデルを表す。Fig 5 よりある風力発電所からの発電電力 3 パターンにおいて,  $\alpha$  が 0.3 のとき SMES の蓄積エネルギー容量は最小になり, 風力発電所の日付や風力発電波形の特徴の違いにより同一のパラメータ  $\alpha$  で SMES の容量を最適化できることを明らかにした。また, 提案したトレンド合成モデルによる FC の運転指令値は FC の応答性で対応可能な範囲に収まり, FC の運転において十分滑らかな波形となった。個別の機器だけで行うことが難しい風力発電の変動電力補償を, 異なる特徴を持つエネルギー源の組み合わせである FC+H<sub>2</sub> システムと SMES で風力発電の変動電力を平滑化できることを示した。このことはエネルギー源としての水素と SMES の組み合わせの有効性を示すものである。

本研究は, さまざまな課題を解決できる超電導, 再生可能エネルギー, 水素などの技術を組み合わせたシステムを提案し, その有効性を示すものである。特に LH<sub>2</sub> の持つ 2 つの特長である冷媒としての機能とエネルギー源としての機能に着目して SMES と LH<sub>2</sub> を組み合わせたときの有効性を検討した。検討の結果, LH<sub>2</sub> と SMES は, 互いの欠点を補い合い, 全体としてメリットが出てくるシステムであると分かった。水素と超電導, 再生可能エネルギーを用いた複合システムの詳細な検討はなされておらず, 本研究はその先駆けとなるものである。本研究をさらに発展させていくことで, 人類の抱える諸問題は解決に向かうことが期待できる。

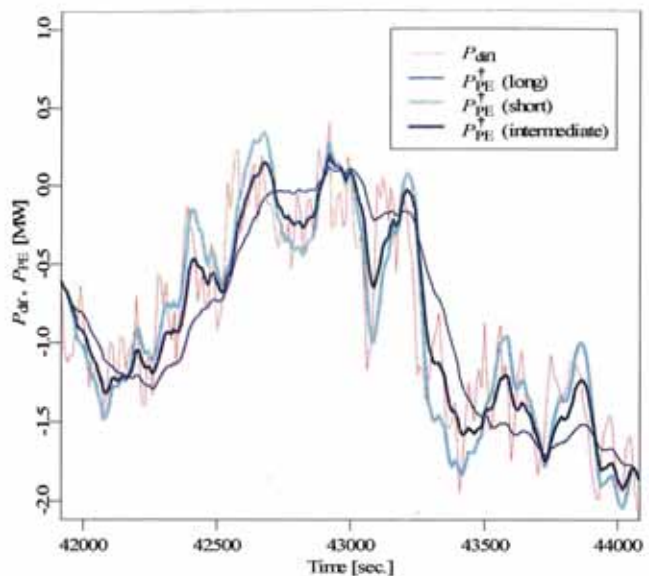


Fig. 4  $P_d$  のトレンド予測結果

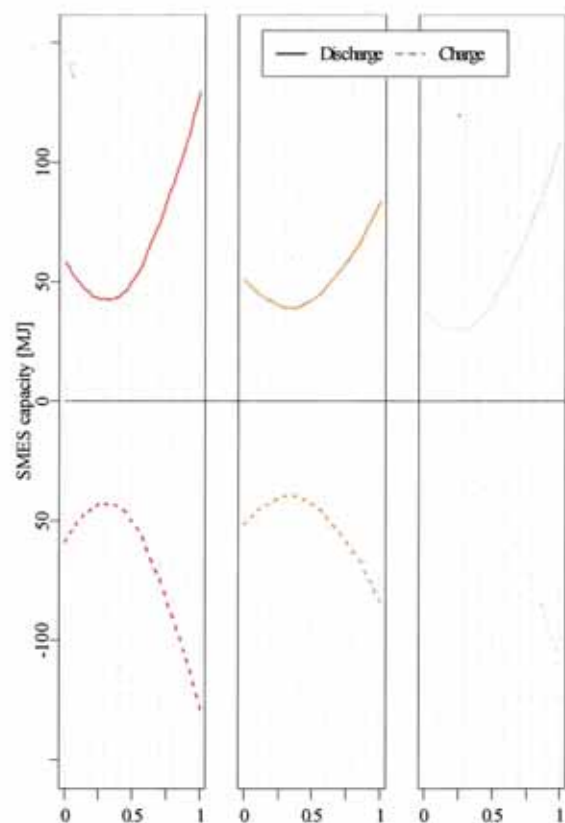


Fig. 53 パターンの WT 波形に対して必要となる SMES エネルギー貯蔵容量とトレンド合成重み  $\alpha$  の関係



# 論文審査結果の要旨

喫緊の課題である地球規模の環境問題やエネルギー資源問題を解決して低炭素社会を実現するために、高効率な電気機器による省エネルギー技術や再生可能エネルギーの大量導入が望まれている。将来の高効率な機器の実現には超電導の応用技術が有効であり、低炭素社会のエネルギー源として再生可能エネルギーを用いた水素エネルギーの有効利用があげられる。超電導機器とその冷媒となる液体水素を組み合わせると、省エネルギー効果が期待され、低炭素社会の実現に寄与できる。本論文は、液体水素温度での超電導体の特性評価、それらで構成された液体水素冷却超電導コイルの有効性と基本設計、および、液体水素超電導コイルの応用例として再生可能エネルギーの有効利用へ適用した結果について述べたもので、全編5章からなる。

第1章は序論であり、本研究の背景と目的を述べている。

第2章では、超電導体の液体水素温度での特性を評価し、液体ヘリウムや液体窒素温度での超電導特性と比較している。特に、超電導体設計の重要な指標である極低温安定性に関する解析を行い、液体水素温度における高温超電導体の安定性は、それよりさらに低い温度である液体ヘリウム温度における特性より優位になることを初めて明らかにしている。これは将来の液体水素冷却超電導技術の基礎となる有用な成果である。

第3章では、液体水素で冷却する大型の超電導コイルの基本設計を実施したもので、漏洩磁界の最も少ないトロイダルコイルによる大型超電導コイルについて述べている。電磁力支持部材が少なくなる一定張力のD型形状コイルに関する電磁界解析法を提案し、超電導体量を最小とする超電導コイルの貯蔵容量と形状の関係を導出し、超電導トロイダルコイルの基本設計技術を確立した。これは、将来の大型超電導コイルを設計する上で重要な成果である。

第4章では、液体水素冷却超電導コイルの次世代の応用として、風力発電と超電導コイルおよび燃料電池によるエネルギー有効利用システムを提案している。風力発電の余剰電力を利用して大量貯蔵が可能な水素を生成・貯蔵するとともに、一部液化して超電導エネルギー貯蔵装置(SMES)の冷却媒体として利用する。電力が必要な時には水素を利用して燃料電池(FC)によって発電する。風力発電波形を急峻に変動する成分とその平均成分に分解し、急峻成分は応答性の速いSMESで、平均成分は応答性の遅いFCで対応する。FCを有効に利用するために、カルマンフィルタを用いた風力変動出力の平均値予測を導入し、SMES容量の最適化を図っている。これは、将来の再生可能エネルギーを有効に利用するために超電導を初めて導入した電力補償システムであり、その実用化に極めて重要となる成果である。

第5章は結論であり、本論文の総括を行っている。

以上要するに本論文は、液体水素冷却超電導コイルの有効性を示し、その基本設計技術を確立し、再生可能エネルギーを制御した電力に変換する超電導システムに適用したもので、超電導応用工学ならびに電気工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。